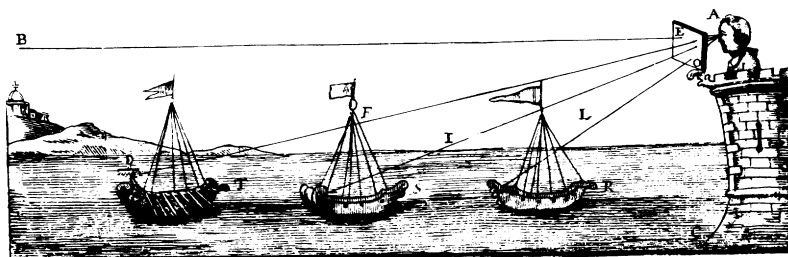


INVESTIGACIÓN DIDÁCTICA



LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA: UN PRINCIPIO DE TODA LA FÍSICA. UNA PROPUESTA Y UNOS RESULTADOS

SOLBES, JORDI¹ y TARÍN, FRANCISCO²

¹ IES J. Rodrigo Botet. Manises

² IES Picassent, València

jordi.solbes@uv.es

Resumen. La conservación de la energía es uno de los conceptos más importantes de la física porque unifica todos los fenómenos. En este artículo presentamos algunos resultados de una investigación sobre el proceso de enseñanza-aprendizaje del concepto de *energía* y su conservación realizado en el nivel de la educación secundaria española. El análisis de los datos pone de manifiesto que la conservación de la energía se introduce en mecánica y termodinámica pero no en todos los campos de la física. Los resultados experimentales se han utilizado para desarrollar un nuevo enfoque de la enseñanza de la energía.

Palabras clave. Energía, educación en física, actividades de enseñanza.

Summary. The conservation of energy is one of the most important physics concepts because it unifies all phenomena. In this paper we present some results of a research on the learning-teaching process of energy and its conservation in Spanish secondary education level. Analysis of the data reveal that energy conservation is introduced in mechanics and thermodynamics but not in all physics domains. The experimental results are used to develop a new approach to energy teaching.

Keywords. Energy, physics education, teaching activities.

INTRODUCCIÓN

La importancia en la enseñanza del concepto de *energía* es reflejo de su importancia social. Por ello no es extraño que múltiples trabajos en didáctica de las ciencias se ocupen de los conceptos de *energía*, *trabajo* y *calor* y las preconcepciones de los estudiantes sobre los mismos.

Entre ellos podemos citar algunos por su importancia para nuestro propio trabajo. Las dificultades en el aprendizaje de la energía tienen su origen en las ideas previas de los estudiantes sobre dicho concepto. De esta manera, se identifica la energía con sus fuentes (Carr y Kirkwood, 1988; Solomon, 1985), la potencia (Goldring y Osborne, 1994) o el trabajo (Duit, 1984; Driver y Warrington, 1985). Otros asocian la energía con el movimiento (Solomon, 1983) o los combustibles (Watts, 1983; Duit, 1981, 1984, 1987). Algunos alumnos muestran una conceptualización material de la energía al considerarla como una sustancia (Duit, 1987; Solomon, 1985) que se puede almacenar (Solomon, 1985) o consumir (Kesidou y Duit, 1993). Estas ideas tienen su origen en la existencia de dos dominios (el científico y el cotidiano) (Duit, 1981; Solomon, 1983) en los que el significado de la energía es diferente. Por otra parte, muchos estudiantes piensan que la energía potencial gravitatoria se encuentra almacenada en el cuerpo sujeto a dicha interacción (Poon, 1986; Solbes y Martín, 1991), consideran el calor como una sustancia material (Albert, 1978; Erickson, 1979, 1980) o una forma de energía (Van Roon et al., 1994) e identifican la cantidad de calor con la temperatura (Arnold, 1994). Sin embargo, no todas las dificultades de los estudiantes en el aprendizaje de la energía tienen su origen en las ideas previas. Al analizar un problema, algunos alumnos lo consideran como proceso en lugar de un sistema que interacciona con el entorno (Driver y Warrington, 1985; López Gay, 1987) mientras que otros siguen un modelo de razonamiento lineal causal que ignora otras circunstancias (Roziar y Viennot, 1991; Van Huls y Van den Berg, 1993). Como consecuencia de lo anterior, los estudiantes no comprenden el significado del concepto de *energía* y el de sus cuatro características fundamentales (transformación, conservación, transferencia y degradación) (Duit, 1981, 1984) por lo que no son utilizados en la interpretación de fenómenos cotidianos (Duit, 1981, 1984; Driver y Warrington, 1985; Trumper, 1991; Kesidou y Duit, 1993; Nichols y Ogborn, 1993).

Con respecto a las ideas de los profesores sobre la energía, se puede señalar que algunos la consideran como una idea abstracta (Sexl, 1981), una sustancia material (Duit, 1987; Falk et al., 1983; Schmid, 1982, 1984) o utilizan un lenguaje inadecuado (Driver y Warrington, 1985; McClelland, 1989). La presentación y el tratamiento del concepto de *energía* en los libros de texto también han sido analizados tanto en el nivel secundario (Strube, 1988; Michinel y D'Alessandro, 1993, 1994) como en el universitario (Michinel y D'Alessandro, 1994).

Los proyectos educativos desarrollados para la enseñanza de la energía son de diversos tipos. Mientras que algunos no utilizan el concepto de *trabajo* para la introducción de la energía (SCSI, 1971; Nuffield, 1974;

Pérez Landazábal et al., 1995; Hierrezuelo et al., 1995), otros no definen la energía (PSSC, 1980; Viglietta, 1989; Trumper, 1991; Caballer et al., 1993): parten de su conservación (Physical Science, 1969; Sexl, 1981) o de su degradación (Viglietta, 1990).

Sin embargo, la mayor parte de los trabajos anteriores se centran en fenómenos mecánicos y térmicos, no consideran que la energía es uno de los conceptos más potentes, fructíferos y unificadores de la física y creen que su conservación es un principio universal de todos los campos de la física y no sólo de la mecánica y de la termodinámica, aspectos en los que se va a centrar nuestra propuesta.

¿DE QUÉ SITUACIÓN PARTIMOS?

Para fundamentar dicha propuesta en la práctica nos planteamos, en primer lugar, analizar cómo se enseña en nuestro país el principio de conservación de la energía y, a continuación, qué consecuencias tiene esto para los alumnos.

Para averiguarlo se realizó un diseño experimental múltiple y convergente. De acuerdo con el mismo, se analizaron las ideas de los estudiantes sobre la energía y la forma en que se enseña dicho concepto desde el punto de vista de los libros de texto y de los profesores. Como los resultados se pueden encontrar con detalle en trabajos anteriores (Solbes y Tarín, 1998; Tarín, 2000), nos limitaremos a presentar un breve resumen de los mismos. El análisis de los libros de texto se hizo a través de un cuestionario formado por 38 ítems que examinaban la introducción de la energía en los siguientes campos de la física: mecánica, termodinámica, vibraciones y ondas, electromagnetismo y física moderna (relatividad y física cuántica). Se examinaron 34 libros de texto utilizados por los estudiantes españoles de edades comprendidas entre 14 y 17 años, es decir, libros correspondientes a los dos últimos cursos de la enseñanza secundaria obligatoria (alumnos entre 14 y 15 años) y a los dos de bachillerato (alumnos comprendidos entre los 16 y 17 años).

Sólo alrededor de un 10 % de los libros de texto considera algunas de las ideas previas de los alumnos sobre energía, trabajo y calor, que hemos señalado en la introducción. Tampoco se presentan como limitaciones de la conservación de la energía mecánica los fenómenos disipativos (rozamiento, colisiones inelásticas, etc.). La enseñanza de la energía se realiza a través de su conservación y transformación y, en menor medida, su transferencia y degradación, dado que, en mecánica, sólo se introducen la energía cinética y potencial. Los aspectos de la energía relacionados con otros campos de la física, diferentes de la mecánica y la termodinámica, aparecen en un porcentaje muy pequeño de libros. El principio de conservación de la energía se utiliza explícitamente raras veces en la interpretación de fenómenos ondulatorios, electromagnéticos o de la física moderna.

El cuestionario dedicado a los profesores tiene como objeto conocer cómo enseñan el concepto de *energía*. Está formado por tres preguntas abiertas que se presentaron por separado. Dichos ítems se refieren a la forma en que se introduce la energía, las formas de energía y la consideración de la conservación de la energía como un principio o un teorema. El cuestionario fue contestado por 60 profesores de educación secundaria de los que 38 se encuentran en periodo de formación y 22 en activo. Encontramos que los profesores presentan la energía sin tener en cuenta las ideas previas de los alumnos sobre dicho concepto. Al igual que ocurre con los libros de texto, los profesores tienen en cuenta mayoritariamente la conservación de la energía y, en menor medida, su transformación, transferencia y degradación. Aunque el 40 % de los profesores sólo presenta la energía cinética y potencial, ninguno de los encuestados tiene en cuenta la energía del campo electromagnético y de la masa en reposo. La conservación de la energía se introduce en mecánica y, en un número reducido de casos, en termodinámica, pero no se señala que se trata de un principio de todos los campos de la física.

Las ideas de los alumnos sobre la energía se investigaron por medio de dos instrumentos. En primer lugar, se utilizó un cuestionario formado por 14 ítems, la mayor parte de los cuales aparecen en la tabla I. Los 11 primeros se refieren a aspectos de la energía en mecánica y termodinámica. Los ítems restantes consideran características de la energía en el movimiento ondulatorio, el electromagnetismo y la relatividad. La muestra total de estudiantes se dividió en dos niveles. El primero estaba formado por 152 estudiantes de 4º de educación secundaria obligatoria (15 años). Estos alumnos contestaron los 11 primeros ítems, dado que en su currículo sólo aparece un tema de trabajo, energía y calor. El nivel 2 lo forman 168 alumnos de 2º de bachillerato (17 años). Dichos alumnos cursan sus estudios en tres institutos diferentes de Valencia y su provincia. En los dos niveles se administraron los cuestionarios después de haber recibido enseñanza antes caracterizada sobre la energía en los temas considerados. Por otra parte, se realizaron entrevistas individuales con estudiantes voluntarios de los dos niveles citados anteriormente y que habían cumplimentado el cuestionario.

Los resultados aparecen en las columnas control (nivel 1 y nivel 2) de la tabla I. La mayor parte de los estudiantes a los que se presenta el concepto de *energía*, de acuerdo con la enseñanza habitual, continúan utilizando sus preconceptos, no comprenden la conservación, transformación, transferencia y degradación de la energía; no tienen claro si la conservación de la energía es un principio o un teorema, y no usan el principio de conservación de la energía para explicar fenómenos de todos los campos de la física. Los alumnos mantienen sus ideas alternativas sobre la energía. De acuerdo con ellas, asocian la energía con los sistemas que se mueven (76 %), como se pone de manifiesto en este fragmento de entrevista (E: entrevistador; A: alumno):

E: ¿Podrías decir cosas cotidianas que tengan energía?

A: Un tren en marcha, un vaso cuando lo dejas caer.

E: ¿Hay cosas que no tengan energía?

A: Una mesa que está quieta, el cenicero que está sobre la mesa.

E: ¿Y por qué piensas que no tienen energía?

A: Porque están paradas. Cuando están moviéndose tienen energía.

Por otra parte, los estudiantes localizan la energía potencial gravitatoria en el cuerpo situado en el campo (98,9 %), confunden las clases de energía con las fuentes (98,7 %) o piensan que la energía se consume (83,5 %). Aunque la enseñanza que han recibido se basa fundamentalmente en la conservación de la energía, no suelen utilizar este aspecto para interpretar fenómenos mecánicos o termodinámicos de acuerdo con Duit (1984). La transformación y la degradación de la energía se emplean con una frecuencia muy pequeña (10,5 % y 16,5 % respectivamente). Entre los fenómenos físicos no mecánicos ni termodinámicos que los estudiantes explican por medio del principio de conservación de la energía se pueden citar la energía de las ondas electromagnéticas (13,1 %) y mecánicas (45,5 %), y la relación relativista entre la masa y la energía (2,9 %). El 71,3 % de los estudiantes tiene ideas confusas referentes a los conceptos de principio y teorema, lo que no facilita identificar la conservación de la energía como un principio general de toda la física.

UNA PROPUESTA PARA ENSEÑAR EL PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

Los resultados presentados en la sección anterior nos llevan a plantear si es posible realizar una enseñanza de la energía que mejore el aprendizaje de la misma. De acuerdo con lo anterior, formularemos una hipótesis en los siguientes términos: «Es posible realizar una enseñanza de la energía que parta de las ideas alternativas de los alumnos para presentar la energía como un concepto unificador de toda la física, desarrollar su conservación, transformación, transferencia y degradación, mostrar el estatus de principio con respecto a su conservación y señalar las limitaciones de su conservación en las formulaciones que aparecen en mecánica y termodinámica.»

La contrastación de esta hipótesis se realizará por medio de la elaboración de materiales curriculares que se presentarán y discutirán con otros profesores. Dichos materiales se aplicarán a estudiantes y se compararán sus resultados con los obtenidos por alumnos a los que se ha presentado el concepto de *energía* a través de la enseñanza habitual.

Dichos materiales se han elaborado planteando el proceso de enseñanza-aprendizaje como una investigación dirigida (Gil et al., 1991). En esta propuesta, los estudiantes, trabajando en pequeños grupos, abordan un suceso o fenómeno, lo que permite conectar con lo que ya saben, y pueden crear disonancia con sus propias ideas. También abordan problemas, formulan hipótesis, proponen diseños experimentales, analizan e interpretan datos y elaboran conclusiones. Resuelven problemas de lápiz y papel como pequeñas investigaciones. Aplican los conceptos introducidos a la comprensión de problemas de relevancia tecnológica, social y ambiental (relaciones CTSA). Y, por último, los estudiantes, con sus profesores, revisan y evalúan lo que

han aprendido. Estas características son compartidas con otros diferentes modelos de indagación escolar (Nacional Research Council, 2000) y se van imponiendo hasta en la propia enseñanza de la universidad, como se puede apreciar en un reciente artículo publicado en *Nature* (Powell, 2003).

Se han diseñado materiales alternativos para la enseñanza de la energía en los niveles de cuarto curso de la enseñanza secundaria obligatoria (estudiantes de 15-16 años), primer curso de bachillerato (estudiantes de 16-17 años) y segundo curso de bachillerato (estudiantes de 17-18 años). Con estos materiales se quiere que, al final del proceso, los estudiantes comprendan el concepto de *energía* y su conservación. Mostramos a continuación, en el cuadro I, qué entendemos por dicha comprensión y las principales dificultades para conseguirla.

A continuación, mostramos de manera más concreta la selección y organización de contenidos que se ha seguido a lo largo de los tres cursos, presentando alguna de las actividades propuestas, cuyo desarrollo íntegro aparece en Calatayud y otros (1995), Solbes y Tarín (1996), Hernández y otros (1999) y, especialmente, en Tarín (2000). En los tres cursos, la introducción del concepto de *energía* se hace siguiendo su desarrollo histórico. Este enfoque permite mostrar las limitaciones de dicho concepto

a lo largo de la historia de la física y los nuevos aspectos que han ampliado su dominio de validez.

En *cuarto curso de educación secundaria obligatoria* se introducen, simultáneamente y de forma cualitativa, el trabajo y la energía. De acuerdo con la definición de Maxwell (1877), el trabajo se presenta como «la transformación de la materia a través de las interacciones». De esta manera, la energía aparece como «la capacidad de un sistema para transformar la materia». A continuación, se establece una relación cuantitativa entre ellos. Esta relación permite caracterizar el trabajo como mecanismo de transferencia de energía. Después se distinguen las formas de energía de las fuentes y se realiza la introducción de la energía cinética y potencial gravitatoria –en la que la siguiente actividad permite constatar, fácilmente, el carácter relativo de las energías potenciales (respecto al nivel tomado como origen de alturas)– y el carácter absoluto de sus variaciones, al igual que ocurría con la energía cinética.

• *Un cuerpo de 10 kg se encuentra a 1,5 m del suelo de una habitación que, a su vez, está a 20 m sobre la calle. El cuerpo se deja caer hasta el suelo de la habitación. Hallad la variación de energía potencial utilizando como sistemas de referencia el suelo de la habitación y el de la calle. Comentad los resultados.*

Cuadro I

¿Qué significa comprender la energía y su conservación?	Dificultades de aprendizaje
Reconocer la energía como una propiedad de todos los sistemas.	Asociar la energía sólo a los sistemas en movimiento o con vida.
Identificar el trabajo como un proceso de transferencia de energía.	Identificar el trabajo con el esfuerzo o definición puramente operativa del trabajo.
Clasificar, inicialmente, distintas formas de energía como cinéticas o potenciales.	Identificar las formas de energía con sus fuentes.
Reconocer la energía cinética como la asociada al movimiento. Asociar la energía potencial gravitatoria a la posición de un objeto sobre la Tierra y atribuirla a la interacción entre el objeto y la Tierra.	Localizar la energía potencial gravitatoria en un objeto.
Reconocer que la energía se transforma.	Analizar los fenómenos en términos perceptivos sin considerar la transformación de la energía.
Reconocer que la energía de un sistema aislado se conserva.	Reconocer el consumo de energía pero no su conservación.
Establecer las limitaciones de la conservación de la energía mecánica.	Desconocer la transformación de energía mecánica en interna.
Reconocer el calor como un mecanismo de transferencia de energía.	Identificar el calor con la temperatura
Interpretar el primer principio de la termodinámica y reconocerlo como una generalización de la ley de conservación de la energía mecánica.	No reconocer la degradación de la energía.
Reconocer la degradación de la energía como la transformación de energía mecánica en calor.	Identificar la transformación de energía mecánica en interna como un gasto de energía.
Utilizar la conservación de la energía en la interpretación de fenómenos de importancia social: crisis de la energía, energías renovables.	Desconocer las relaciones CTS.
Valorar las consecuencias ambientales de la producción y consumo de la energía.	Desconocer las relaciones CTSA.
Reconocer otras formas de energía: campos libres, energía en reposo y energía como un principio unificador de toda la física.	Identificar toda la energía con cinética o potencial.
Identificar el principio de conservación de la energía como un principio de toda la física.	Limitarlo a la mecánica y la termodinámica.

A continuación se presenta la conservación de la energía mecánica. El análisis de fenómenos disipativos (rozamiento y choques inelásticos) muestra los límites de validez de la conservación de la energía mecánica, que se realiza mediante la siguiente actividad:

- *Considerad situaciones en que parece no cumplirse el principio de conservación de la energía.*

Después de la introducción del calor como otra forma de transferencia de la energía, se muestra a los estudiantes un principio general de conservación de la energía: la energía total de un sistema aislado se conserva. Por sistema aislado se entiende aquél en el que no hay intercambios o transferencias de energía con su entorno mediante trabajo, calor o cualquier proceso de transferencia que se pueda estudiar en cursos posteriores.

El tratamiento que los libros de texto dan a la energía en mecánica activa en los alumnos los esquemas de su transformación y conservación. Sin embargo, la transferencia y la degradación apenas se utilizan, a pesar de que los cuatro aspectos indicados se consideran necesarios para la comprensión del concepto de *energía* (Duit, 1981, 1984). De acuerdo con lo anterior, en nuestro proyecto alternativo de enseñanza de la energía se propondrán actividades de transformación y transferencia de energía así como la realización de cadenas de procesos en los que se identificarán las formas de energía, y el trabajo o el calor como mecanismos de transferencia.

Sin embargo, con las propiedades de transformación, conservación y transferencia, no se completa nuestra descripción de la energía. Para ello es necesario que el estudiante comprenda la degradación de la energía (Duit, 1987; Brook y Wells, 1988). Esto se realiza mostrando al estudiante que en la naturaleza hay procesos irreversibles. Tales procesos cumplen el principio de conservación de la energía pero sólo tienen lugar en un sentido debido a la degradación de ésta. Los libros de texto de nivel secundario no suelen presentar en mecánica este aspecto de la energía. Para interpretar problemas en los que interviene el rozamiento, se utilizan expresiones del tipo «el trabajo se convierte en calor», «la energía se disipa» o similares. Por otra parte, los medios de comunicación transmiten una idea de consumo de la energía, o de agotamiento o crisis, muy diferente de la idea de conservación que se considera en la ciencia, aparente paradoja que se resuelve fácilmente con la idea de degradación.

En el *primer curso de bachillerato* se revisan los aspectos anteriores profundizándolos. Así se introduce la energía cinética mediante el teorema de las «fuerzas vivas» y la potencial (gravitatoria y, además, elástica) relacionándola con las fuerzas conservativas. Se comprueba que en los sistemas aislados la suma de ambas se conserva. A continuación se introduce la energía interna (considerada como la suma de la energía cinética y potencial internas de un conjunto grande de partículas), el calor (como proceso de transferencia de energía) y la primera ley de la termodinámica. Todos estos procesos mecánicos y termodinámicos nos han ido acostumbrando a pensar en la energía como una magnitud que se conservaba de forma general.

Por ello, el principio de conservación de la energía válido en todos los campos de la física se puede enunciar diciendo que la energía total de un sistema aislado se conserva. Por sistema aislado o cerrado entendemos aquél en que no hay intercambios o transferencias de energía con su entorno mediante trabajo, calor, ondas mecánicas o electromagnéticas o cualquier otro proceso de transferencia. Para determinar la energía total hay que identificar los tipos de energía del sistema. En general, podemos encontrarnos con energía de las partículas libres (la cinética y la de su masa en reposo), energía de los campos libres (la energía de la radiación electromagnética), energía de las interacciones entre partículas y campos (que es potencial si los campos son conservativos). Cada una de estas contribuciones a la energía total del sistema puede variar con el tiempo transformándose en una de otro tipo, pero su suma no cambia, se conserva.

La degradación de la energía debe ser tratada analizando los procesos irreversibles y la reducción de utilidad de la energía para realizar trabajo cuando se transforma en energía interna, cuya introducción resulta muy clarificadora (Arons, 1989). Esto se hace por medio del análisis de fenómenos que no se producen en la naturaleza a pesar de cumplir la primera ley de la termodinámica (Strnad, 1984). Para ello se plantea a los estudiantes la siguiente actividad:

- *En la naturaleza un objeto que se desliza sobre una superficie acaba parándose, una pelota que cae rebota a una altura menor; etc., pero no se observa que un objeto pesado empiece a moverse o que una pelota rebote cada vez más alta. ¿Alguno de estos procesos incumple la ley de conservación de la energía? Tratatad de establecer la causa de que unos procesos se realicen en la naturaleza y otros no.*

En el tema siguiente, la corriente eléctrica, la deducción de la ley de Ohm generalizada muestra la utilización de la conservación de la energía en fenómenos no mecánicos ni termodinámicos.

Pero es en el *segundo curso de bachillerato* donde se pone claramente de manifiesto el principio de conservación de la energía como un principio de toda la física. Así, se realiza el estudio energético de las interacciones gravitatoria y eléctrica. Además se analizan diversos procesos a través del principio de conservación de la energía. Entre ellos se pueden indicar la velocidad de escape del campo gravitatorio, el amortiguamiento y la atenuación de las ondas mecánicas, y la inducción electromagnética. También se muestra la transferencia de energía mediante ondas mecánicas, señalando que se trata de energía continua y deslocalizada en el frente de ondas, cuyo valor es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda mecánica.

A continuación aparece un nuevo aspecto de la energía a través del concepto de *campo electromagnético*. Aunque algunos autores (Poon, 1986; Jäkel, 1990) recomiendan la introducción del vector de Poynting y del carácter local de la conservación de la energía, nuestra propuesta sólo muestra que la energía del campo electromagnético es proporcional al cuadrado del campo. Didácticamente es muy interesante referirse a la radiación como mecanismo de transferencia de energía. Esta forma de transmisión de energía se presenta en nuestra propuesta, junto con la conducción y la convección, como mecanismo de transmisión del calor.

La contribución más relevante de la teoría especial de la relatividad al concepto de *energía* es el de energía en reposo (Okun, 1989; Bickerstaff y Patsakos, 1995). Se debe hacer énfasis en que la energía en reposo no es equivalente a ninguna de las formas de energía presentadas hasta el momento: energía cinética, potencial, interna y de los campos libres. A continuación, se analiza la equivalencia masa/energía, aplicándola a la radiactividad y a las reacciones nucleares.

En física cuántica se muestra el carácter cuantizado de la energía de la radiación y de los sistemas atómicos. Para ello, se parte de la hipótesis de Einstein en su análisis del efecto fotoeléctrico. Se aplica el principio de conservación de la energía al efecto fotoeléctrico y a las transiciones electrónicas del átomo de Bohr. La proporcionalidad de la intensidad de la onda con el cuadrado de la amplitud permite justificar la interpretación probabilista de Born, como podemos ver en la siguiente actividad:

• *Teniendo en cuenta que, como hemos visto en temas anteriores, la intensidad de una onda luminosa es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico y que según Einstein es proporcional al número de fotones por unidad de tiempo y de superficie, indicad qué significado podemos atribuir a dicha amplitud.*

Se aplica la relación de indeterminación de Heisenberg energía-tiempo para estimar la anchura de las rayas espectrales o la masa de la partícula intercambiada en las interacciones (Giancoli, 1985). Por último, se muestra que la desintegración β puso en cuestión la conservación de la energía a nivel microscópico y el posterior descubrimiento del neutrino supuso su confirmación (Ne'eman y Kirsh, 1988).

RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS ALUMNOS

La propuesta alternativa de enseñanza-aprendizaje de la energía presentada anteriormente se utilizó con alumnos de nivel 1 (cuarto curso de enseñanza secundaria obligatoria) y nivel 2 (primer y segundo cursos de bachillerato). Estos grupos se llamarán experimentales para distinguirlos de los que tomaron parte en la validación de la primera hipótesis, que se denominarán grupos de control. Los materiales alternativos fueron aplicados por los autores y por profesores de diversos institutos, utilizando la misma metodología.

Para constatar que el aprendizaje era realmente significativo tres meses después de que la propuesta alternativa fue aplicada a los estudiantes, contestaron el cuestionario indicado anteriormente y utilizado en el análisis de la enseñanza de la energía. En la tabla I se muestran los resultados de los grupos experimentales comparados con los de control. Por grupos experimentales entendemos los que han recibido la enseñanza de la energía por medio de los materiales de nuestra propuesta (Tarín, 2000). Dicha enseñanza ha sido realizada por los propios autores y por otros profesores. En todos los grupos, la diferencia entre los resultados obtenidos por los grupos de control y experimentales es estadísticamente significativa de acuerdo con la prueba de *t-student* ($\alpha < 0,01$). También

se realizaron entrevistas a 13 estudiantes, elegidos al azar, que formaban parte de los grupos tratados por los autores. Como guión de la entrevista se utilizó el cuestionario de 14 ítems indicado anteriormente. Las entrevistas fueron grabadas para su análisis posterior.

Como ponen de manifiesto los resultados de la tabla I, se ha producido una mejora en el aprendizaje de los estudiantes que han seguido la nueva propuesta de enseñanza de la energía frente a los alumnos que han aprendido el concepto de acuerdo con la metodología de transmisión oral. En todos los ítems de los cuestionarios de alumnos utilizados se ha producido un aumento considerable en el número de respuestas correctas. De este modo, las respuestas correctas varían entre el 30,3 % y el 71,2 %, en los grupos experimentales de nivel 1 tratados por profesores diferentes a los autores, en tanto que, en los de nivel 2, oscilan entre el 38,3 % y el 90,5 %. Los datos también ponen de manifiesto que una gran parte de los estudiantes reconocen la energía como una propiedad de todos los sistemas (ítem 2):

A: Cualquier cosa tiene energía.

E: ¿Y si está parada?

A: Si no tiene cinética, que es de movimiento, tiene potencial, de la posición que ocupa. Todas las cosas tienen energía.

La mayor parte de los alumnos tratados diferencian los teoremas y los principios y consideran que la conservación de la energía es un principio de toda la física.

E: ¿Tú crees que los principios y los teoremas se cumplen siempre?

A: Los teoremas no sirven para todo. Hay casos en que no. Si coges el teorema de Pitágoras, sólo te sirve para unos triángulos y para otros, no.

E: ¿Y los principios?

A: Sí, porque sirven para todos los casos.

E: Y la conservación de la energía, ¿qué es: un principio o un teorema?

A: Un principio, porque es verdad, se cumple siempre. Por ejemplo, en la moto, la energía se va transformando pero no se pierde.

Muchos estudiantes utilizan la conservación de la energía para explicar fenómenos mecánicos (ítem 4) y de otros campos de la física (ítems 9a y 13). También reconocen la degradación de la energía (ítem 11) así como otros tipos de energía no mecánica como la del campo electromagnético (ítem 12) y la de la masa en reposo (ítem 14). Todas las diferencias de los resultados obtenidos por los dos grupos de control y experimentales resultan significativas estadísticamente con un nivel de confianza del 1 %.

CONCLUSIONES Y UNA POSIBLE PERSPECTIVA

Los resultados de este estudio señalan que se produce una mejora significativa en el aprendizaje de la energía si se realiza una enseñanza de la misma en el nivel secundario que parta de las ideas alternativas de los estudiantes para presentar la energía como un concepto unificador de toda la física, desarrollar su conservación, transformación, transferencia y degradación, mostrar el estatus de principio o teorema con respecto a su conservación y señalar las limitaciones de su conservación en las formulaciones que aparecen en mecánica y termodinámica.

Tabla I
Resultados comparativos del cuestionario de alumnos. Niveles 1 y 2 (Selección)

Ítem	Nivel 1			Nivel 2		
	Control (N = 152)	Otros profesores (N = 108)	Autores (N = 45)	Control (N = 168)	Otros profesores (N = 74)	Autores (N = 57)
	%	%	%	%	%	%
2. Cita tres ejemplos de sistemas con energía y tres de sistemas sin energía.	15,0	71,2	83,3	33,6	90,5	94,7
3. Indica fenómenos que puedan ser explicados por el principio de conservación de la energía.	20,3	30,3	54,2	20,8	52,2	87,5
4. Se deja caer una pelota de tenis sobre un suelo duro y se observa que rebota como se ve en la figura. ¿Se conserva la energía mecánica en el sistema formado por la pelota y el suelo?	8,2	49,0	62,5	4,6	74,3	84,2
5. La conservación de la energía, ¿es un principio o un teorema?	7,3	48,1	54,2	9,8	71,6	89,1
7. ¿Crees que la energía es sólo cinética o potencial?	1,3	48,6	62,5	1,3	62,2	85,7
8. Un cuerpo de 25 kg situado a una altura de 30 m se dice que tiene una energía potencial de 7.500 J. ¿Dónde crees que está esa energía potencial?	1,4	23,0	58,3	0,7	50,0	66,7
9.a. Un trozo de hierro se calienta al rojo vivo y se deja enfriar. ¿Se conserva la energía en el sistema formado por el aire y el trozo de hierro?	32,7	58,2	70,8	33,1	67,1	75,0
9.b. Indica los mecanismos por los que se transfiere la energía que tiene el trozo de hierro.	10,3	71,2	75,0	3,6	67,7	76,6
10. Explica las transformaciones de energía que tienen lugar desde que el agua contenida en un pantano produce electricidad hasta la utilización de dicha electricidad para hervir agua en una cocina.	9,8	54,4	66,7	11,2	69,0	78,9
11. Si la energía se conserva, ¿por qué se habla de crisis energética?	20,0	58,8	66,7	13,1	64,4	75,4
12. ¿Por qué las ondas electromagnéticas que se emiten desde una emisora de televisión pueden producir imágenes y sonidos en tu televisor?	---	---	---	13,1	73,1	78,2
14. Algunos autores dicen que, según Einstein, la materia se transforma en energía. ¿Pone esto en cuestión el principio de conservación de la energía?	---	---	---	2,9	38,3	66,7

En concreto, los alumnos a los que se aplica esta propuesta alternativa consideran la energía como una propiedad de todos los sistemas, comprenden su conservación, transformación, transferencia y degradación; reconocen la conservación de la energía como un principio universal y lo utilizan para analizar fenómenos de todos los campos de la física.

Por otra parte, pensamos que los materiales elaborados y los resultados obtenidos con ellos ofrecen una perspectiva de interés para motivar a los estudiantes de secundaria hacia el estudio de la física. Diversos autores (Matthews, 1991; VV AA, 1996) ponen de manifiesto un descenso del número de alumnos que estudian física en la secundaria y, en consecuencia, en la universidad. Para evitarlo se proponen soluciones basadas en actualizar los pro-

gramas de física, incluyendo tópicos de física moderna. Pero la inclusión de temas nuevos y motivadores no debe implicar un aumento de extensión del currículo. Hay que cambiar temas (Alonso, 1992). En este espíritu, algunos afirman que «los alumnos pueden interesarse más por temas como el origen del universo, los semiconductores, etc., que en la aburrida cinemática, en la abstracta ley de Newton» (Ostermann y Moreira, 2000). Esto choca con varios obstáculos: a) la tradición que considera la mecánica como la columna vertebral de la física y, en consecuencia, que la mayor parte de los libros empiecen por cinemática, dinámica, etc.; b) la falta de actualización del profesorado en los temas de física moderna; y c) el rechazo de algunos profesores de física a un tratamiento más cualitativo de la misma, único posible en los temas de física moderna.

Sin embargo, en nuestra investigación hemos visto que el concepto de *energía* y su conservación es un principio que se puede utilizar en la práctica totalidad de los temas de física, en tanto que las leyes de Newton se aplican sólo en la física clásica y no en toda (ya que la termodinámica tiene un enfoque no mecanicista). Por otra parte, dicho principio permite tratamientos cuantitativos más sencillos (escalares) que los dinámicos (vectoriales), incluso de los mismos problemas. Esto nos sugiere la posibilidad de reallizar en los cursos básicos de física un tratamiento basado

en el principio de conservación (que actuaría como principio unificador), el cual permitiría introducir temas como: el trabajo y la energía, el estudio del calor, otras formas de transferencia (las ondas [sonido, luz], aplicaciones de la conservación de la energía en electromagnetismo y física moderna, como las antes mencionadas) y, por último, temas CTS (Solbes y Vilches, 1997) como fuentes y usos de la energía. Quedarían para cursos preuniversitarios temas más formales como cinemática, dinámica, movimiento vibratorio y ondulatorio, campos, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERT, E. (1978). Development of the concept of heat in children. *Science Education*, 62(3), pp. 389-399.
- ALONSO, M. (1992). Actualizando el curso de física general. *Revista Española de Física*, 6(3), pp. 32-35.
- ARNOLD, M. (1994). Children's and lay adults' views about thermal equilibrium. *International Journal of Science Education*, 16(4), pp. 405-419.
- ARONS, A.B. (1989). Developing the Energy Concepts in Introductory Physics. *The Physics Teacher*, 27, pp. 506-517.
- BICKERSTAFF, R.P. y PATSAKOS, G. (1995). Relativistic generalizations of mass. *European Journal of Physics*, 16, pp. 63-66.
- BROOK, A. y WELLS, P. (1988). Conserving the circus? *Physics Education*, 23, pp. 80-85.
- CABALLER, M.J. et al. (1993). *Ciencias de la naturaleza, 4º curso*. Madrid: MEC.
- CALATAYUD M.L., HERNÁNDEZ J., SOLBES J. y VILCHES, A. (1995). *Física y química 1º Bachillerato*. Barcelona: Octaedro.
- CARR, M. y KIRKWOOD, V. (1988). Teaching and learning about energy in New Zealand secondary school junior science classrooms. *Physics Education*, 23, pp. 87-91.
- DRIVER, R. y WARRINGTON, L. (1985). Students' use of the principle of energy conservation in problem situations. *Physics Education*, 20, pp. 171-176.
- DUIT, R. (1981). Understanding Energy as a Conserved Quantity-Remarks, en R. U. Sexl. *European Journal of Science Education*, 3(3), pp. 291-301.
- DUIT, R. (1984). Learning the energy concept in school-empirical results from The Philippines and West Germany. *Physics Education*, 19, pp. 59-66.
- DUIT, R. (1987). Should energy be illustrated as something quasi-material? *European Journal of Science Education*, 9(2), pp. 139-145.
- ERICKSON, G. (1979). Children's conceptions of heat and temperature. *Science Education*, 63(2), pp. 221-230.
- ERICKSON, G. (1980). Children's viewpoints of heat: A second look. *Science Education*, 64(3), pp. 323-336.
- FALK, G., HERRMAN, F. y SCHMID, B. (1983). Energy forms or energy carriers? *American Journal of Physics*, 51, pp. 1074-1077.
- GIANCOLI, D.C. (1985). *Física, I y II*. Barcelona: Reverté.
- GIL, D., CARRASCOSA, J., FURIÓ, C. y MARTÍNEZ TORREGROSA, J. (1991). *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*. Barcelona: ICE-Horsori.
- GOLDRING, H. y OSBORNE, J. (1994). Students' difficulties with energy and related concepts. *Physics Education*, 29, pp. 26-31.
- HERNÁNDEZ, J., PAYÁ, J., SOLBES, J. y VILCHES, A. (1999). *Física y química 4º ESO*. Octaedro: Barcelona.
- HIERREZUELO, J. (coord.) et al. (1995). *Ciencias de la Naturaleza, 4*. Madrid: Edelvives – MEC.
- JÄKEL, C.E. (1990). Spezziamo una lancia a favore del vettore de Poynting. *La Fisica nella Scuola*, 23(3), pp. 62-73.
- KESIDOU, S. y DUIT, R. (1993). Students' Conceptions of the Second Law of Thermodynamics. An interpretative Study. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(1), pp. 85-106.
- LÓPEZ GAY, R. (1987). Las representaciones de los alumnos como punto de partida. El caso de la energía. *Investigación en la Escuela*, 3, pp. 47-54.
- MATTHEWS, M. R. (1991). Un lugar para la historia y la

- filosofía en la enseñanza de las ciencias. *Comunicación, Lenguaje y Educación*, 11-12, pp. 141-155.
- MAXWELL, J.C. (1877). *Matter and motion* (reed., 1991). Nueva York: Dover.
- McCLELLAND, G. (1989). Energy in school science. *Physics Education*, 24(3), pp. 162-164.
- MICHINEL, J.L. y D'ALESSANDRO, A. (1993). Concepciones no formales de la energía en textos de física para la escuela básica. *Revista de Pedagogía*, 33, pp. 41-59.
- MICHINEL, J.L. y D'ALESSANDRO, A. (1994). El concepto de energía en los libros de texto: de las concepciones previas a la propuesta de un nuevo sublenguaje. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(3), pp. 369-380.
- NACIONAL RESEARCH COUNCIL (2000). *Inquiry and the National Science Education Standards. A Guide for Teaching and Learning*. Washington D.C.: Nacional Academia Press.
- NE'EMAN, Y. y KIRSH, Y. (1988). *Los cazadores de partículas*. Barcelona: Gedisa.
- NICHOLLS, G. Y OGBORN, J. (1993). Dimensions of children's conceptions of energy. *International Journal of Science Education*, 15(1), pp. 73-81.
- NUFFIELD. (1974). *Física básica*. Barcelona: Reverté.
- OKUN, L.B. (1989). The concept of mass. *Physics Today*, 42(6), pp. 31-36.
- OSTERMANN, F. y MOREIRA, M.A. (2000). Física contemporánea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando la formación de profesores. *Enseñanza de las Ciencias*, 18(3), pp. 391-405.
- PÉREZ LANDAZÁBAL, M.C., FAVIERES, A., MANRIQUE, M.J. y VARELA, P. (1995). La energía como núcleo en el diseño curricular de la física. *Enseñanza de las Ciencias*, 13(1), pp. 55-65.
- PHYSICAL SCIENCE II (PS II), PRELIMINARY EDITION. (1969). IPS Group, Educational Development Center: Newton, Massachusetts.
- POON, C.H. (1986). Teaching field concept and potential energy at A-level. *Physics Education*, 21(5), pp. 307-316.
- POWELL, K. (2003). Spare me the lecture. *Nature*, 425, pp. 234-237.
- PSSC (1974). *Física. Guía del profesor*. Barcelona: Reverté.
- ROZIER, S. y VIENNOT, L. (1991). Students' reasoning in thermodynamics. *International Journal of Science Education*, 13(2), pp. 159-170.
- SCHMID, G.B. (1982). Energy and its carriers. *Physics Education*, 17(5), pp. 212-218.
- SCHMID, G.B. (1984). An up-to-date approach to physics. *American Journal of Physics*, 52(9), pp. 794-799.
- SCIS (Science Curriculum Improvement Study). (1971). *Energy Sources. Teacher's Guide*. Chicago y Nueva York: Rand McNally.
- SEXL, R.U. (1981). Some Observations Concerning the Teaching of the Energy Concept. *European Journal of Science Education*, 3(3), pp. 285-289.
- SOLBES, J. y MARTÍN, J. (1991). Análisis de la introducción del concepto de campo. *Revista Española de Física*, 5, pp. 34-40.
- SOLBES, J. y TARÍN, F. (1996). *Física 2º Bachillerato*. Barcelona: Octaedro.
- SOLBES, J. y TARÍN, F. (1998). Algunas dificultades en torno a la conservación de la energía. *Enseñanza de las Ciencias*, 16(3), pp. 387-397.
- SOLBES, J. y VILCHES, A. (1997). STS interactions and the teaching of physics and chemistry. *Science Education*, 81(4), pp. 377-386.
- SOLOMON, J. (1983). Learning about energy: How pupils think in two domains. *European Journal of Science Education*, 5(1), pp. 49-59.
- SOLOMON, J. (1985). Teaching the conservation of energy. *Physics Education*, 20, pp. 165-176.
- STRNAD, J. (1984). The second law of thermodynamics in a historical setting. *Physics Education*, 19(2), pp. 94-100.
- STRUBE, P. (1988). The presentation of energy and fields in physics texts-a case of literary inertia. *Physics Education*, 23, pp. 366-371.
- TARÍN, F. (2000). «El principio de conservación de la energía y sus implicaciones didácticas». Tesis doctoral. Universitat de Valencia. (No publicada).
- TRUMPER, R. (1991). Being constructive: An alternative approach to the teaching of the energy concept-part two. *International Journal of Science Education*, 13(1), pp. 1-10.
- VAN HULS, C. y VAN DEN BERG, E. (1993). Teaching energy: A systems approach. *Physics Education*, 28, pp. 146-153.
- VAN ROON, P.H., VAN SPRANG, H.F. y VERDONK, A.H. (1994). «Work» and «Heat»: on a road towards thermodynamics. *International Journal of Science Education*, 16(2), pp. 131-144.
- VIGLIETTA, L. (1989). Il II principio della termodinamica in un corso di Fisica a livello di scuola secondaria superiore: una approccio macroscopico, adenda a *La fisica nella scuola*, 22, pp. 5-43.
- VIGLIETTA, L. (1990). A more «efficient» approach to energy teaching. *International Journal of Science Education*, 12(5), pp. 491-500.
- VV.AA. (1996). Rethinking post-16's physics. *Physics Education*, 31(5), pp. 265-309.
- WATTS, D.M. (1983). Some alternative views of energy. *Physics Education*, 18, pp. 213-216.

[Artículo recibido en marzo de 2003 y aceptado en noviembre de 2003]